

**Morphogenèse des barrages de travertin de Coal River Springs,
sud-est du Territoire du Yukon**

**Morphogenesis of Travertine Dams of Coal River Springs,
Southeast Yukon Territory**

**Morphogenese der Kalksinterdämme von Coal River Springs,
südöstliches Yukon-Gebiet**

Marie-Anne Geurts, Monique Frappier et Hsien Ho Tsien

Volume 46, numéro 2, 1992

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/032906ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/032906ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Les Presses de l'Université de Montréal

ISSN

0705-7199 (imprimé)

1492-143X (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Geurts, M.-A., Frappier, M. & Tsien, H. H. (1992). Morphogenèse des barrages de travertin de Coal River Springs, sud-est du Territoire du Yukon. *Géographie physique et Quaternaire*, 46(2), 221–232. <https://doi.org/10.7202/032906ar>

Résumé de l'article

L'étude de travertins, situés sur la rive gauche de la Coal River (SE du Yukon), permet de mieux comprendre la genèse de ces dépôts par leur description morphologique, soutenue d'observations hydrologiques et microfaciologiques. L'analyse morphologique révèle que les barrages de travertin sont des phytohermes, à croissance discontinue attribuable aux variations de débit. Une forme nouvelle appelée « encorbellement inverse » est décrite et correspond à une croissance en eau calme. L'analyse microscopique identifie : 1) un faciès algaire de type *Phormidium*/*Schizothrix* qu'on trouve sur des supports ligneux et des formes en vase, 2) un faciès en glomérule d'origine probablement bactérienne, observé sur la face amont de grands barrages, et 3) un faciès bryophytique qui est le plus fréquent et qui apparaît au sommet des barrages, c'est-à-dire dans les zones de croissance verticale. Les mousses les plus fréquentes sont *Brachytecium* sp., *Bryum* sp., *Cratoneuron* sp., et *Gymnostomum recurvirostrum* (Hedw.). Les phytohermes sont situés dans le cadre stratigraphique de l'Holocène, après l'encaissement de la Coal River dans ses alluvions. Ils se construisent selon le modèle suivant : leur croissance verticale ainsi que l'épaississement de leur face aval se font surtout par l'encroûtement des mousses et l'épaississement de leur face amont se réalise davantage par l'intermédiaire des faciès cyanobactériens.

MORPHOGENÈSE DES BARRAGES DE TRAVERTIN DE COAL RIVER SPRINGS, SUD-EST DU TERRITOIRE DU YUKON

Marie-Anne GEURTS, Monique FRAPPIER et Hsien Ho TSIEN; première auteure: Centre géoscientifique Ottawa-Carleton et Département de géographie, Université d'Ottawa, 165, rue Waller, Ottawa, Ontario K1N 6N5; deuxième auteure: Département de géographie, Université d'Ottawa; troisième auteur: Department of Geology, National Taiwan University, 245 Choushan Road, Taipei, Taiwan, Republic of China et Département de géologie, Université catholique de Louvain, 3, place Louis-Pasteur, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique.

RÉSUMÉ L'étude de travertins, situés sur la rive gauche de la Coal River (SE du Yukon), permet de mieux comprendre la genèse de ces dépôts par leur description morphologique, soutenue d'observations hydrologiques et microfaciologiques. L'analyse morphologique révèle que les barrages de travertin sont des phytohermes, à croissance discontinue attribuable aux variations de débit. Une forme nouvelle appelée «encombellement inverse» est décrite et correspond à une croissance en eau calme. L'analyse microscopique identifie: 1) un faciès algaire de type *Phormidium/Schizothrix* qu'on trouve sur des supports ligneux et des formes en vase, 2) un faciès en glomérule d'origine probablement bactérienne, observé sur la face amont de grands barrages, et 3) un faciès bryophytique qui est le plus fréquent et qui apparaît au sommet des barrages, c'est-à-dire dans les zones de croissance verticale. Les mousses les plus fréquentes sont *Brachytecium* sp., *Bryum* sp., *Cratoneuron* sp., et *Gymnostonium recurvirostrum* (Hedw.). Les phytohermes sont situés dans le cadre stratigraphique de l'Holocène, après l'encaissement de la Coal River dans ses alluvions. Ils se construisent selon le modèle suivant: leur croissance verticale ainsi que l'épaississement de leur face aval se font surtout par l'encroûtement des mousses et l'épaississement de leur face amont se réalise davantage par l'intermédiaire des faciès cyanobactériens.

ABSTRACT *Morphogenesis of travertine dams of Coal River Springs, southeast Yukon Territory.* This study examines the travertine deposits exposed along the left bank of the Coal River located in southeast Yukon. The main purpose of this project is to gain a better understanding of the genesis of these deposits through their morphological descriptions, which include observations of inherent hydrological and microfacies characteristics. The travertine dams are phytoherms characterized by discontinuous forms. This discontinuous nature is attributed to variations in river discharge. A new form named "inversed corbeling" is identified and corresponds to a growth development in a low energy water. Microscopic analyses distinguish: 1) a *Phormidium/Schizothrix* algal facies, observed on pieces of wood or vase shaped substrates, 2) a glomerulitic facies of supposed bacterial origin, observed on the upstream face of dams, and most commonly, 3) a bryophytic facies observed on dam summits, where vertical growth forms prevail. The most common mosses observed are *Brachytecium* sp., *Bryum* sp., *Cratoneuron* sp. and *Gymnostonium recurvirostrum* (Hedw.). The phytoherms are placed within the Holocene stratigraphic framework, resulting from the incision of the Coal River into its alluvial deposit. A growth model for phytoherms is proposed. Their vertical growth and the thickening of the downstream face is made especially by encrusting of mosses, and the thickening of their upstream face mainly corresponds to cyanobacterial facies.

ZUSAMMENFASSUNG *Morphogenese der Kalksinterdämme von Coal River Springs, südöstliches Yukon-Gebiet.* Die Untersuchung der Kalksinter auf dem linken Ufer des Coal River (Südost-Yukon) führt zu einem besseren Verständnis der Genese dieser Ablagerungen mittels ihrer morphologischen Beschreibung, gestützt auf Beobachtungen der Hydrologie und der Mikrofazies. Die morphologische Analyse ergibt, daß die Kalksinterdämme Phytohermes sind mit unstetigem Wachstum aufgrund der Variationen der Wasserführung. Eine neue Form, genannt "umgekehrtes Gesims", wird beschrieben; sie entspricht dem Wachstum bei ruhigem Wasser. Die mikroskopische Analyse identifiziert: 1) eine Algen-Fazies vom Typus *Phormidium/Schizothrix*, die man auf holzigen Stützen und vasenförmigen Unterlagen findet, 2) eine Knäuel-Fazies, möglicherweise bakteriellen Ursprungs, die auf dem Stirnhang oberhalb der großen Dämme zu sehen ist, und 3) eine bryophytische Fazies, die am häufigsten auftritt und auf der Spitze der Dämme erscheint, d.h. in den Bereichen vertikalen Wachstums. Die häufigsten Moose sind *Brachytecium* sp., *Bryum* sp., *Cratoneuron* sp., und *Gymnostonium recurvirostrum* (Hedw.). Die Phytohermes befinden sich im stratigraphischen Rahmen des Holozän, nachdem der Coal River sich in seinen Alluvionen eingesenkt hatte. Sie bilden sich nach folgendem Modell: ihr vertikales Wachstum sowie die Verdickung ihrer stromabwärts gerichteten Seite geschieht vor allem durch Verkrustung der Moose, und die Verdickung ihrer stromaufwärts gerichteten Seite wird mehr mittels der zyanobakteriellen Fazies realisiert.

INTRODUCTION

Dans la littérature récente, de nombreux travaux se sont attachés à décrire les formations de travertins des points de vue géochimique (Lorah et Herman, 1989), biochimique (Adolphe et Billy, 1974; Emeis *et al.*, 1987), botanique (Pentecost, 1987; Pentecost et Lord, 1988), pétrographique (Guendon et Vaudour, 1981; Utech et Chafetz, 1989) pétrologique (Irion et Muller, 1968; Golubic, 1973), morphologique et micromorphologique (Casanova, 1981 et 1984; Julia 1983; Chafetz et Folk, 1984; Pedley, 1987; Braithwaite *et al.*, 1989; Ford, 1989). Pour leur part, Geurts (1976, 1988) et Newton et Grossman (1988) en ont souligné l'utilité pour l'étude des fluctuations climatiques ou paléoenvironnementales. Pourtant, il apparaît que le problème de la morphogenèse des barrages et des gours n'est pas résolu (Viles et Goudie, 1990).

L'explication géomorphologique de ce type de formation est souvent cherchée dans l'existence d'une rupture de pente dans le profil longitudinal du cours d'eau. Cette rupture provoque une augmentation de la turbulence et, par conséquent, modifie les équilibres physico-chimiques. C'est le cas des barrages des lacs de Plitvice, en Yougoslavie (Roglic, 1981). C'est aussi le cas des barrages en retenues d'ordre décimétrique et des barrages cascades d'ordre décimétrique décrit par Casanova (1981), dans le sud-est de la France. On peut donc se demander si les différentes formes des barrages sont liées à la turbulence.

Cet article consacré aux barrages de travertin de Coal River Spring, au sud-est du Yukon, se propose donc d'examiner cette relation, tout en élaborant un modèle de croissance des barrages. Le modèle se base sur l'observation macroscopique et microscopique des faciès, tant sur les faces amont que sur les faces aval des barrages. La forme des barrages sera discutée à la lumière de la littérature récente.

LOCALISATION ET ENVIRONNEMENT

Ces barrages sont localisés sur la rive gauche de la Coal River (fig. 1), dans la forêt boréale, au sud-est du Yukon (60°09'08"N, 127°26'02"W, altitude au pied du dépôt: 640 m). Ils ont été décrits brièvement sous les termes de «*terraced tufa deposit*» par Gabrielse et Blusson (1969, p. 21). Plus récemment, le caractère spectaculaire du site a été révélé par Moise (1983). La création d'un parc portant le nom de Coal River Springs Park a nécessité une évaluation des ressources réalisée par Land Planning Branch (Davies *et al.*, 1983) et par Tera Environmental Consultant LTD (manuscrit, 1983), après des études préliminaires de Dennington (1975).

La Coal River est un affluent de la rivière au Liard et elle appartient à la région climatique du bassin du Liard. Selon les cartes climatiques de Walh *et al.* (1987), la vallée se caractérise par une température moyenne journalière annuelle comprise entre -3 et -4°C, une température moyenne journalière de janvier comprise entre -20 et -25°C, et une température moyenne journalière du mois le plus chaud (août) de 12,5 à 15°C. La vallée se situe entre les isohyètes 500 et 600 mm de précipitations totales annuelles (Walh *et al.*, 1987, fig. 9.5), ce qui correspond à des précipitations abondantes par rapport à l'ensemble du Yukon. Compte tenu de la latitude élevée, la

durée d'ensoleillement varie de moins de 6 heures, le 21 décembre, à près de 19 heures, le 21 juin. Il s'agit d'un élément à considérer dans tout système naturel lié directement ou indirectement à la photosynthèse.

Le massif rocheux qui domine à l'est le site des barrages est composé de calcaire, de dolomie et de brèches dolomitiques rattachés à des formations d'âge silurien à dévonien moyen, dont l'épaisseur pourrait atteindre 900 m (Gabrielse et Blusson, 1969). Des phyllites calcaireuses et des calcaires phylliteux du Cambrien moyen (?) et de l'Ordovicien inférieur d'environ 750 m d'épaisseur supportent les dépôts quaternaires au nord du site et à l'ouest de la rivière (Gabrielse et Blusson, 1969). Il s'agit d'un contact de formations d'âges différents. Ces auteurs proposent donc l'existence d'une faille le long de la vallée. Elle serait le prolongement vers le sud de la faille nommée Rock River Fault.

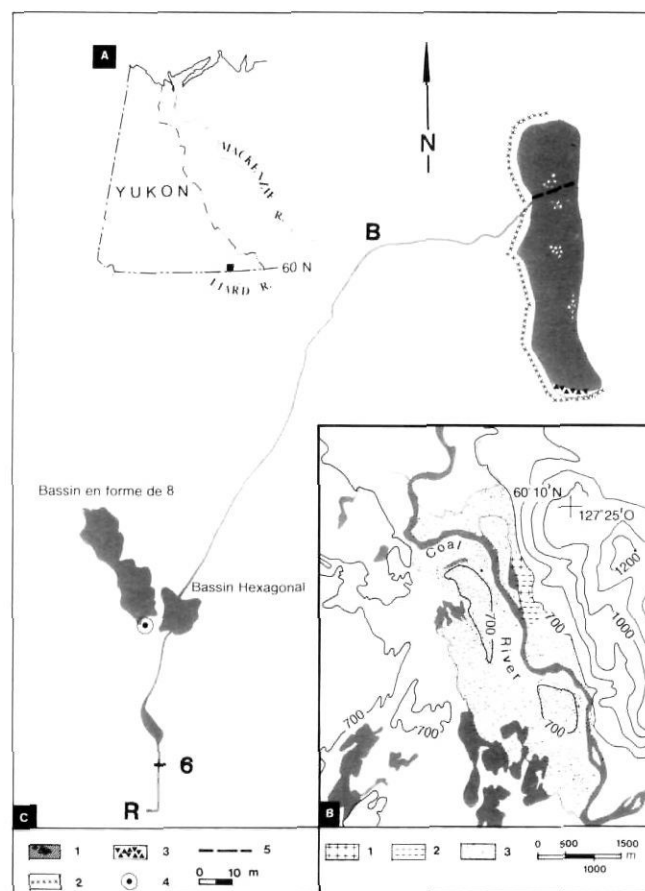


FIGURE 1. A) Localisation de la région étudiée, B) topographie et dépôts de travertins actifs (1) et anciens (2) et dépôts alluviaux et fluvioglaciers (3), C) plan sommaire du site montrant des bulles (1) dans le plan d'eau des sources, le barrage de castor (2), des matériaux détritiques (3), un monticule de pression hydrostatique (4), et un drain (5). Pour les détails sur B, R et 6, voir le texte.

A) Location of study area, B) topography and active (1) and old (2) deposits of travertine and alluvial and fluvioglacial deposits (3), C) summary map of the site showing bubbles (1) in the sources pond, the beaver's dam (2), clastic materials (3), and one hydrostatic pressure mound (4), and a drain pipe (5). For details on B, R, and 6, see text.

La région étudiée se situe à l'intérieur des limites de la dernière glaciation et les sédiments qui bordent la rivière sont fluvioglaciaires et fluviaux. Ces derniers, épais de 5 à 20 m, sont taillés en terrasses fluviales. Les Coal River Springs sont deux sources distantes d'environ 800 m. Leurs eaux s'écoulent sur les convexités des talus des terrasses et favorisent la formation des dépôts de travertin qui apparaissent en clairière au milieu de la forêt. Ce contexte géomorphologique confère aux dépôts un âge postglaciaire, qui sera précisé ultérieurement par datation radiométrique. Les descriptions de cet article se rapportent au site sud où quelques bassins vides de grande dimension ont permis l'observation de la face amont des barrages.

Par ailleurs, la forêt boréale cache des travertins fossiles qui couvrent un puissant conglomérat. Ce dernier n'est pas cité dans la littérature régionale. Ce conglomérat et le travertin fossile pourraient être plus anciens que d'âge holocène.

DESCRIPTION DU SITE

LES SOURCES

Les sources sont situées au pied des talus d'éboulis qui bordent le versant, et l'eau sourd dans le plus grand plan d'eau du site (79 m de longueur et 20 m de largeur). Un barrage de castor en forme la limite ouest. Le niveau du plan d'eau a été rabattu par la construction d'un drain qui canalise l'écoulement. Les berges exposent du matériel organique (bois, restes de mollusques), du sable fin argileux et des granules de travertin. Le fond se compose de cailloux calcareux et de vase. Quelques hauts fonds sont effervescents et quatre orifices exhale des bulles d'un gaz inodore (probablement du CO_2). La profondeur des sources est respectivement évaluée à 1,45 m de part et d'autre du drain et à 1,80 m à la source principale (le 26 juin 1989).

LE RUISSEAU

Le drain se déverse dans le ruisseau et la première cascade (20 cm) de travertin est située à 9,10 m du sommet du barrage de castor. Le ruisseau s'écoule ensuite sur une surface en pente douce et aboutit à un élargissement (fig. 1c, pt. B, à 46,8 m du précédent) où il bifurquait anciennement pour s'écouler et se perdre en terre vers l'ouest (communication orale de M. McRae). Récemment, le démontage d'un barrage de castor a rectifié le cours vers le sud-ouest où le ruisseau aboutit actuellement dans le premier bassin (nommé bassin hexagonal), après un parcours de 117,2 m dont la pente s'accroît vers l'aval. Un peu en amont du bassin, le cours d'eau se subdivise en plusieurs bras. Durant les étés 1988 et 1989, le bassin hexagonal se drainait par ses deux angles nord, d'une part vers le bassin en forme de huit au nord-ouest et d'autre part vers d'autres cascades et bassins au sud et au sud-est. Peu après le point 6 du transect, le ruisseau se perd dans le dépôt et le point R indique une résurgence au niveau d'un ruisseau (un bras de la Coal River).

LE DÉPÔT PRINCIPAL

Un profil topographique, levé au clinomètre et au décimètre, a livré les dimensions du dépôt principal; longueur: 125 m, hauteur depuis le bassin hexagonal jusqu'à la résurgence: 22,5 m (Fig. 2). Il se prolonge au nord et au sud-est

par des dépôts fossiles. Il est constitué d'une série de barrages et bassins de dimensions très variables. Les bassins les plus larges et les plus profonds (bassin hexagonal: 14,3 m de diagonale et 6,35 m de profondeur maximale; bassin en huit: 38,3 m de longueur et 5,3 m de profondeur) sont localisés dans la partie supérieure de la formation travertineuse. Avec l'accentuation de la pente, les bassins deviennent étroits et s'étirent parallèlement au flanc du massif. Enfin, les bassins sont bordés par des barrages dont les sommets sont en guirlandes à convexité orientée vers l'amont.

HYDROLOGIE

Les sources de ce site sont décrites comme hydrothermales (Brandon, 1965; Souther et Halstead, 1973). La température se maintient entre 12 et 13°C, le débit de 45 l/sec, et l'eau contient quelque 326 ppm de constituants chimiques majeurs: Ca, Mg, SiO_2 , HCO_3 et SO_4 (Grandall et Sadler-Brown, 1976). Cependant l'analyse isotopique révèle que l'eau de la source a un $\delta^{18}\text{O} = -22,67\text{‰}$, ce qui est conforme aux eaux souterraines à recharge météorique du sud-est du Yukon (Fritz et al., 1987, fig. 6). L'alimentation des bassins est irrégulière et nettement influencée par les eaux météoriques. Ainsi, le bassin en huit débordait le 1^{er} juillet 1989, alors que son plan d'eau était rabattu d'environ 40 cm le 1^{er} juillet 1988. Entre-temps, un été et un automne très pluvieux (communication orale de M. McRae) expliquent le rehaussement du plan d'eau en 1989.

MORPHOLOGIE DES BARRAGES

L'observation macroscopique permettra de décrire les principaux caractères des barrages, à savoir: 1) une stratification en bancs, 2) des encorbellements inverses, 3) un faciès tubulaire au sommet des encorbellements, 4) un faciès en glomérule sur la face amont des barrages. Par ailleurs, les sommets des bancs plus anciens forment des plateformes sur lesquelles



FIGURE 2. Le dépôt principal de 125 m de longueur et 22,5 m de hauteur s'étire en une succession de barrages et bassins. En haut à droite du dépôt, on reconnaît le bassin hexagonal et à gauche, le bassin en forme de huit.

The main deposit (length: 125 m; height: 22.5 m) is a succession of dams and basins. In the upper right corner of the deposit, the hexagonal basin and on the left, the eight-shaped basin.

s'enracinent des formes en vase. La description des formes et leur variation dans l'espace permet de préciser la morphogénèse des barrages, leur croissance verticale ainsi que leur épaissement.

Les grands barrages sont penchés vers l'amont et parfois nettement en porte-à-faux (fig. 3). Leurs hauteurs égales ou supérieures à leurs épaisseurs évoquent les biohermes continentaux des barrages de travertin de Band e Amir, en Afghanistan central (Lang et Lucas, 1970).

La face amont des barrages montre une succession de plusieurs bancs (cinq bancs bien visibles sur la fig. 3) indiquant des phases de croissance interrompues par des périodes d'inactivité, voire d'érosion. Le banc supérieur présente des encoissements inverses coalescents dont les rayons de courbures s'accroissent vers le haut. Ce sont des formes turbinées (angle apical du cône = 70°) selon la terminologie des coraux (Hill, 1956; Poty, 1981).

Dans les bancs supérieurs, la stratification est bien nette vers le haut et elle s'estompe en profondeur (fig. 4). Dans l'exemple présenté, le banc a une épaisseur d'environ 65 cm et se subdivise en couches de 1 à 3 cm d'épaisseur, formées d'un faciès tubulaire (bien visible au sommet), auquel se superpose un faciès d'excroissance en glomérules, dont le diamètre s'accroît vers le bas (4-5 cm).

Le profil de l'encorbement montre des phases de croissance verticales et latérales de la morphologie, des phases de croissance uniquement verticales, et des phases d'arrêt donnant une forme convexe vers le haut comme le bord supérieur arrondi du barrage. Des discontinuités interrompant la stratification indiquent la zone de coalescence de deux édifices. Vers le bas, des espaces non calcifiés témoignent des espaces laissés libres par les organismes encroûtants lors de la construction du barrage.

Les formes décrites ci-dessus, à savoir les bassins profonds, les encoissements inverses et l'allure penchée des grands barrages vers l'amont, définissent l'originalité de ce site,

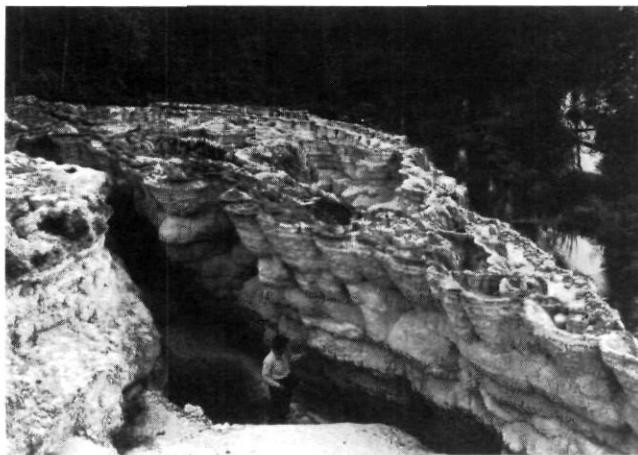


FIGURE 3. Face d'amont d'un barrage avec grands encoissements au sommet et stratifications indiquant des discontinuités dans la croissance.

Upstream face of the dam showing large corbelling at the summit and bedding indicating discontinuities.

qui se distingue des *terraced mount* de Mammoth Hot Spring au Wyoming, décrits par Chafetz et Folk (1984).

À l'avant plan des barrages, on observe des formes en vases turbinés ou trochoïdes (angle apical = 40°) qui s'enracinent dans des vases plus anciens ou sur des sortes de plate-forme (fig. 5). Au sommet et au centre des vases, on trouve un matériel calcifié et poreux dont la structure rappelle la trace des mousses. Quant aux plateformes, elles ont une largeur variable. Leur surface supérieure, couverte d'une mince couche de débris, est généralement inclinée vers le bassin amont. Cette surface recoupe le matériel calcifié et poreux contenant la trace de mousses. Ces plateformes ne peuvent donc pas être comparées aux plateformes stromatolitiques décrites par Braithwaite *et al.* (1989).

Enfin, il faut encore noter que le sommet des grands barrages est très étroit (10-15 cm d'épaisseur) et les formes en guirlande au sommet des encoissements inverses à large rayons de courbure n'apparaissent qu'avec les bassins les plus larges. Elles peuvent être remplacées latéralement par des formes cérébroïdes d'un rayon de courbure de 1 à 2 dm (fig. 6), quand le bassin devient plus étroit. Ces formes cérébroïdes sont souvent associées à une face amont verticale plutôt qu'à des morphologies en porte-à-faux. Elles sont aussi beaucoup plus fréquentes quand les barrages sont de petites tailles et rapprochés. Ceci indique que les formes cérébroïdes sont liées à une plus grande turbulence de l'eau puisque, dans le cas de deux barrages proches, la turbulence liée à la chute d'eau amont est ressentie jusqu'au barrage aval. Il est clair aussi que la croissance en circonvolutions augmente la surface de contact entre les organismes constructeurs et l'eau et donc optimise l'utilisation d'un espace plus restreint.

Les creux des guirlandes et les plis aval des circonvolutions sont souvent plus bas (quelques millimètres à 1 cm) que le

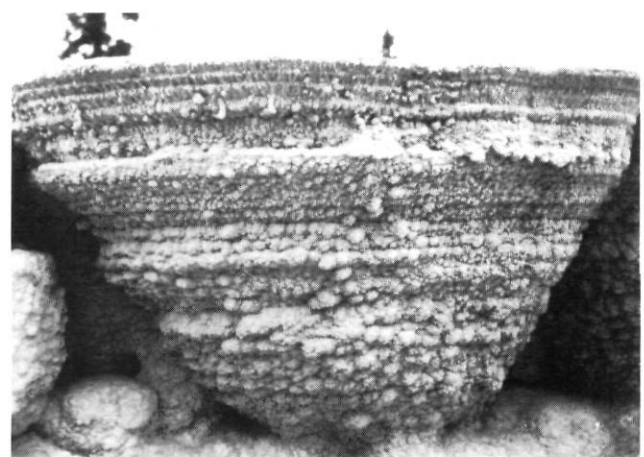


FIGURE 4. Un encoissement de 60 cm de hauteur montrant des phases de croissance verticale et latérale, des phases de croissance verticale et des phases sans croissance. En haut, on voit un faciès tubulaire dans au moins trois couches; en bas, le faciès en glomérule cache le faciès tubulaire.

A corbelling (60 cm high) showing vertical and lateral growing phases, vertical growing phases and no-growth phases. Top: a tubular facies in at least three layers. Bottom: the glomerule facies covering the tubular facies.

reste du barrage (fig. 7). Parfois, ce creux des guirlandes, qui correspond à la zone de contact entre deux encorbellements, est non soudé et peu encroûté, constituant ainsi des déversoirs lorsque le bassin est rempli. Ces creux se prolongent souvent en petits promontoires sur la face aval des barrages et donnent naissance à des cascates formées d'une série de mini-barrages et bassins.

Sur la face aval épaissie d'un barrage, on peut constater que des cascates bien individualisées passent soit latéralement, soit vers l'aval, à un système qui évolue en une forme convexe. En effet les mini-bassins sont recouverts progressivement par les matériaux des mini-barrages, ce qui régularise la forme d'ensemble (fig. 8). La progradation horizontale de la forme convexe peut atteindre un vase ou couvrir des petits bassins, donnant ainsi une allure concave au pied du barrage.

LA VÉGÉTATION

Un inventaire de la végétation du parc a été publié par Davies *et al.* (1983). La forêt boréale sur la terrasse se com-

pose surtout de *Picea mariana*, de *Picea glauca*, de *Pinus contorta*, de *Betula papyrifera* et d'*Alnus crispa*. Sur les biohermes et les cascates, les phanérogames dominantes sont *Erigeron philadelphicus*, *Mimulus guttatus* et des graminées. Les Bryophytes, ont été étudiés par Steere et Scotter (1978). Dans la présente étude, l'observation porte d'abord sur la distribution spatiale des mousses les plus fréquentes et sur quelques-uns de leurs caractères. Ensuite nous envisageons la localisation et le rôle des algues.

Brachytecium sp., *Bryum* sp., *Cratoneuron* sp. et *Gymnostonium recurvirostrum* (Hedw.) sont les mousses les plus communes observées sur les travertins (tabl. I). Des touffes et des coussins de *Bryum* et de *Cratoneuron* se développent sur le replat sommital des barrages des bassins en eau. Les tapis de *Cratoneuron* (mousse aquatique au Canada selon Richardson, 1981) dominent particulièrement les creux entre deux encorbellements et les plis aval des formes cérébroïdes) et flottent dans l'eau. *Cratoneuron* colonise aussi des faces aval de barrage et reçoit l'eau qui déborde des bassins. Dans

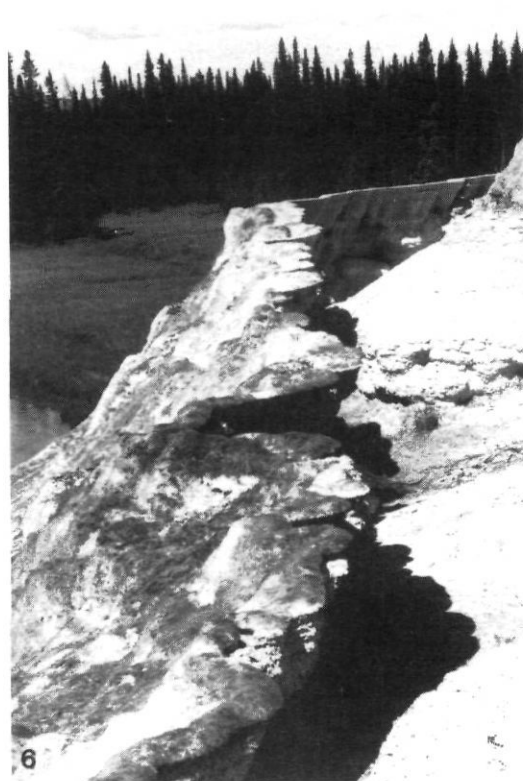


FIGURE 5. Vase trochoïde enraciné dans une plateforme.

Trochoide vase rooted on a shelf.

FIGURE 6. Sommet étroit d'un barrage montrant des encorbellements et des formes cérébroïdes, et sur la face aval, des cascates actuellement inactives.

The narrow summit of a dam with corbellings and cerebroid forms. On the downstream face presently inactive little falls.

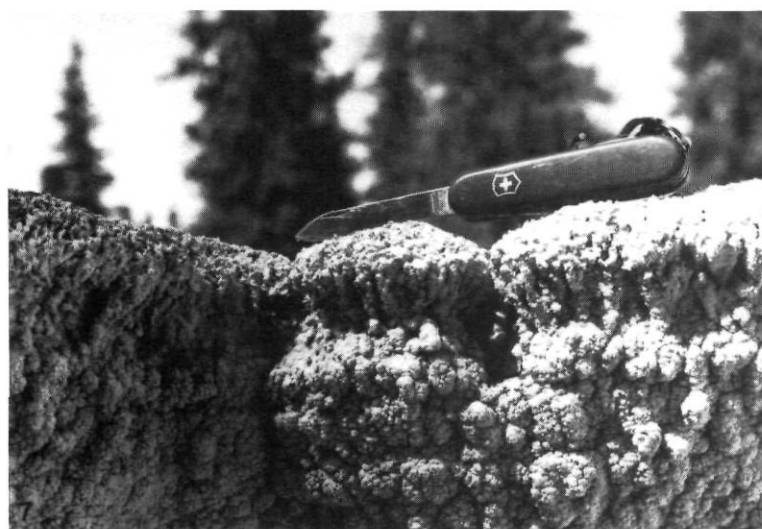


FIGURE 7. Au sommet d'un barrage, zone plus basse entre deux encorbellements ou entre deux formes cérébroïdes servant d'exutoire quand le bassin est rempli.

At the top of the dam, a lower zone between two corbellings or between two cerebroid forms which serves as a drainage channel when the basin is filled.

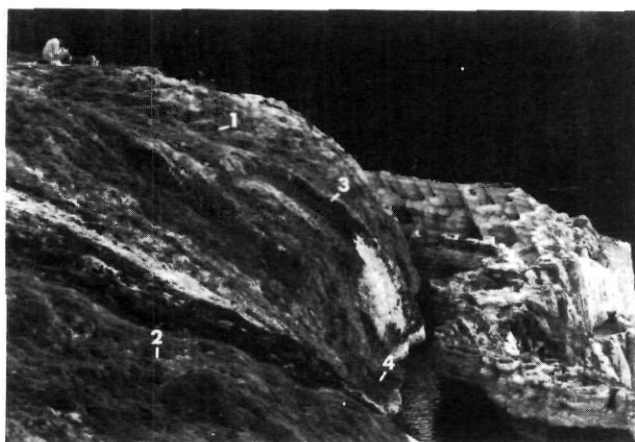


FIGURE 8. Étapes de l'épaississement d'une face aval de barrage: (1) cascades avec mini-barrages et mini-bassins; (2) mini-bassins couverts par les encroûtements successifs des mini-barrages; (3) évolution vers une convexité généralisée; (4) bassin entièrement recouvert par la progradation horizontale de la forme convexe, donnant une forme concave au pied du barrage.

Stages of thickening of a downstream face of a dam: (1) small cascades with minidams and minibasins; (2) minibasins covered by successive encrusting of the minidams; (3) evolution toward generalized convexity; (4) basin entirely covered by horizontal prograding of the convex form, producing a concave form at the foot of the dam.

ce cas les tiges tombent en mèches suintantes, et sont généralement cimentées de calcite.

Lorsque les bassins ne sont pas complètement remplis d'eau, le sommet des encorbellements ou des formes cérébroïdes montrent des touffes de *Bryum* sp. flétries et faiblement encroûtées, en dessous desquelles on observe les formes tubulaires décrites précédemment. Du *Bryum* de couleur sombre pousse aussi sur la face aval des barrages. Les tiges sont agglomérées à leur apex par un ciment calcitique.

Gymnostomum recurvirostrum colonise souvent les faces aval des barrages de forte pente et les environs des petits bassins asséchés. Seule la partie inférieure de la mousse est encroûtée.

Des tiges saillantes de *Brachytecium* caractérisent les blocs noir olive et poreux trouvés dans les cascades du ruisseau. Dans les zones de turbulence et dans les petits bassins entre les cascades, s'observent des amas de débris en forme de pelote, de *Brachytecium* et de *Cratoneuron*.

Ces observations indiquent donc que *Brachytecium* et *Cratoneuron* sont essentiellement aquatiques dans ce site, tandis que *Bryum* et *Gymnostomum* seraient davantage adaptés à une croissance aérienne. Une plasticité phénotypique est cependant connue chez beaucoup de mousses, en relation avec l'habitat (Gimingham et Birse, 1957) notamment chez *Bryum* et chez *Cratoneuron*. Lorsque ces deux mousses sont inféodées à un milieu aquatique, leurs tiges s'allongent et leurs feuilles sont moins nombreuses et plus allongées. Si elles s'accommodent d'un milieu mésohydrique, leur feuillage devient plus dense et les thalles s'érigent. Enfin, on a constaté que *Bryum* raccourcit et rougit quand son substrat s'assèche, ce qui se réalise quand le niveau d'eau baisse dans un bassin.

TABLEAU I

Mousses recueillies et identifiées en 1989 et 1988

Bryophytes échantillonnées sur les sites de Coal Rivers Springs en juillet 1989:

Amblyodon dealbatus (Hedw.) B.S.G.
Amblystegium riparium B. & S.
Aulacomnium palustre Schwaeg.
Brachytecium sp.
Bryum sp.
Bryum pseudotriquetrum (Hedw.) Schwaeg.
Cratoneuron commutatum var. *falcatum*
Cratoneuron filicinum (Hedw.) Spruce
Drepanocladus aduncus (Hedw.) Warnst
Gymnostomum recurvirostrum (Hedw.)
Leptobryum pyriforme (L.) Wils.
Plagiomnium ellipticum (Brid.) Kop. *Mnium rugicum* (Laur.)
Thuidium recognitum (Hedw.) Lindb.

Bryophytes échantillonnées aux environs des sites en juillet 1989:

Funaria hygrometrica (L.) Shreb.
Hylocomium splendens (Hedw.) B.S.G.
Polytrichum juniperium Hedw.
Thuidium abietinum (L.) B. & S.
Tortula ruralis (Hedw.) Gaertn., Meyer & Scherb.

Autre mousse échantillonnée sur les barrages en juillet 1988:

Philonotis fontana (Hedw.).

Les algues participent aussi à la construction des édifices travertineux et elles construisent notamment des faciès de type cyanobactérien (voir ci-dessous). Par ailleurs, des tapis d'algues de la famille des Zygnemataceae et du genre *Spirogyra* couvrent partiellement les planchers et les plateformes de certains bassins. Ces algues développent en quelques jours des mamelons où des tentacules qui s'étirent vers la surface de l'eau où ils restent suspendus à quelques fragments de tufs poreux (fig. 9). En s'étirant les tentacules se déchirent et dérivent avec les fragments de tuf. Ils peuvent être emportés par le courant vers les barrages et exportés vers les faces aval grâce aux eaux de déversement. Les algues se déposent sur des mousses notamment du type *Gymnostomum* mais aussi sur *Bryum* et *Cratoneuron*, et créent ainsi un milieu propice pour la précipitation de la calcite de telle sorte qu'on observe des croûtes algaires interstratifiées au faciès de type bryophytique (fig. 10).

LES MICROFACIÈS

La charpente des barrages est surtout constituée par les associations de mousses, et accessoirement, par des fragments ligneux (troncs, branches, racines) sur lesquels se sont développés des colonies d'algues ou de bactéries. Les principaux faciès observés sont décrits dans l'ordre de leur abondance décroissante, sur la base de photographies ou des dessins réalisés à partir de ces dernières.

Les sommets des barrages présentent un faciès bryophytique typique (fig. 11). Sur cette coupe parallèle à la croissance et à quelques centimètres sous la surface, on reconnaît les mousses (de type *Bryum*) érigées en position de vie. Le long des tiges et des feuilles, on observe la formation d'une trame

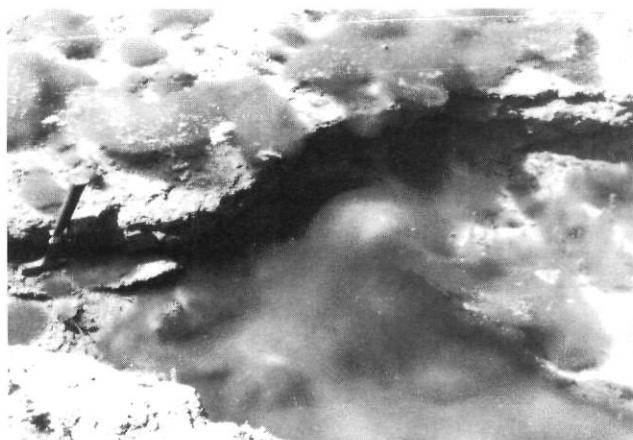


FIGURE 9. Tapis, mamelon et tentacules d'algues (*Spirogyra*) sur une plateforme immergée (juillet 1989).

Algae (*Spirogyra*) forming, knoll and tentacles on a immersed shelf (July 1989).

microsparitique probablement engendrée par des microorganismes. Un mince ciment isopaque se forme sur les parois des cavités constitutionnelles (espace libre entre des tiges ou des feuilles). Ce faciès, et surtout la cimentation des cavités constitutionnelles, sont comparables au faciès algo-bryophytique décrit par Guendon et Vaudour (1981, fig. 8). On observe ce faciès bryophytique dans les encoissements et les formes cérébroïdes. Le faciès tubulaire cité précédemment, en représente l'aspect externe.

Dans la partie aval d'un barrage inactif, on observe une trame microsparitique autour des mousses (fig. 12). Le diamètre de la tige centrale atteint 240 μm et les parois internes de la tige sont couvertes de micrite. La microsparite qui borde la tige atteint 20 à 30 μm d'épaisseur et les cristaux de plus grande dimension sont visibles près des cavités constitutionnelles. Cette figure montre une réduction du volume des vides par cimentation secondaire.

Sur des bois, sur des vases ou sur des parois amont des barrages s'observent des faciès laminés de type cyanobactérien composés de l'alternance de couches foncées de microsparite biogénétique, et de croûtes sparitiques de calcite limpide (fig. 13). Cette alternance rappelle le type de rythmicité réalisée par la croissance égale des filaments, de *Rivularia haematites* avec ou sans bactéries, qui déterminerait des zones claires et des zones sombres bien délimitées (Caudwell, 1983), et aussi par l'association *Phormidium/Schizothrix* (Monty et Mas, 1981; Casanova et Nury, 1989). Il s'apparente aussi au faciès décrit par Pedley (1987), où les franges sparitiques insèrent les filaments des colonies d'oscillatoriacées.

Le faciès en glomérule présente une structure d'axes courts reliés à une zone centrale (fig. 14). Le long des axes, on observe des amas de filaments brunâtres entrelacés (fig. 15). Certains de ces amas servent de nucléus autour desquels se dispose une sparite radiaire (100 μm), limitée par les mêmes amas filamenteux. Cette microstructure ne peut être rattachée au développement bryophytique ni au développement algaire et pourrait être bactérien. Ce faciès en glomérule couvre les faces amont des encoissements et de certains barrages.

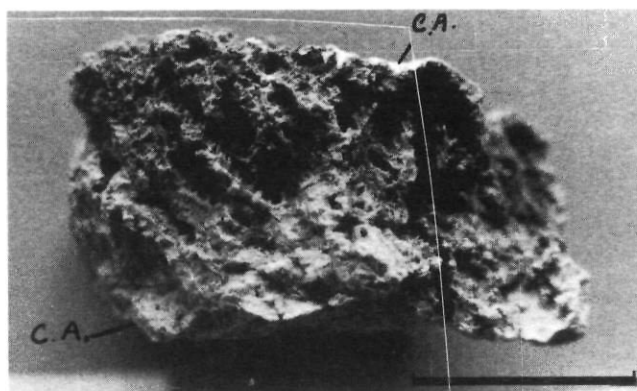


FIGURE 10. Échantillon Y.89-14 montrant des mousses incrustées au centre et des croûtes algaires (C. A.) aux faces inférieure et supérieure de l'échantillon (échelle: 3 cm).

(Sample Y.89-14) showing incrustated moss at the centre. Algae crusts at the lower and upper faces of the sample (scale: 3 cm).

Enfin, un échantillon provenant des travertins fossiles situés au sud du dépôt principal montre plusieurs étapes de minéralisation (fig. 16). Ces étapes comprennent: 1) le développement des mousses dont on observe les traces, notamment dans la partie gauche de la figure, 2) le développement de microsparite probablement biogénétique car très colorée et 3) une cimentation. Dans l'exemple de la figure 16, on observe des ciments de première génération (C1); ces ciments sont isopaques, et la taille des cristaux augmente vers le centre des cavités. Des ciments de deuxième et de troisième générations (C2 et C3) s'observent vers le centre des cavités et leurs cristaux sont équi-granulaires. Enfin, on note une perforation dans le ciment, qui pourrait être liée à des endolithes.

Le faciès bryophytique est le plus abondant, suivi des faciès de type cyanobactérien et du faciès en glomérule. Une diagenèse précoce est visible par le début de la cimentation isopaque des cavités constitutionnelles dans les échantillons des sommets de barrage. Elle s'est probablement réalisée en milieu phréatique. La cimentation isopaque des trois générations de ciment de l'échantillon de travertin fossile indiquerait aussi un milieu phréatique.

DISCUSSION ET MODÈLE DE CROISSANCE

Dans ce site, ce sont surtout les mousses qui commandent la forme des barrages, car elles constituent l'élément principal de leur charpente, comme dans le cas des barrages de Plitvice, en Yougoslavie (Emeis *et al.*, 1987). Les barrages qui correspondent à des biohermes construits sont donc ce que Pedley (1987) nomme des phytohermes (au sens de Buccino *et al.*, 1978), dans sa description d'un ancien barrage de tuf au pays de Galles. Cependant les phytohermes de Coal River Springs se différencient de ceux du pays de Galles par une taille élevée et par un profil penché vers l'amont. La morphologie des phytohermes, ainsi que celle des encoissements et des formes cérébroïdes, doit néanmoins s'envisager comme une résultante du mode de croissance des associations bryophytiques et donc de leur relation avec l'eau, notamment sa turbulence.

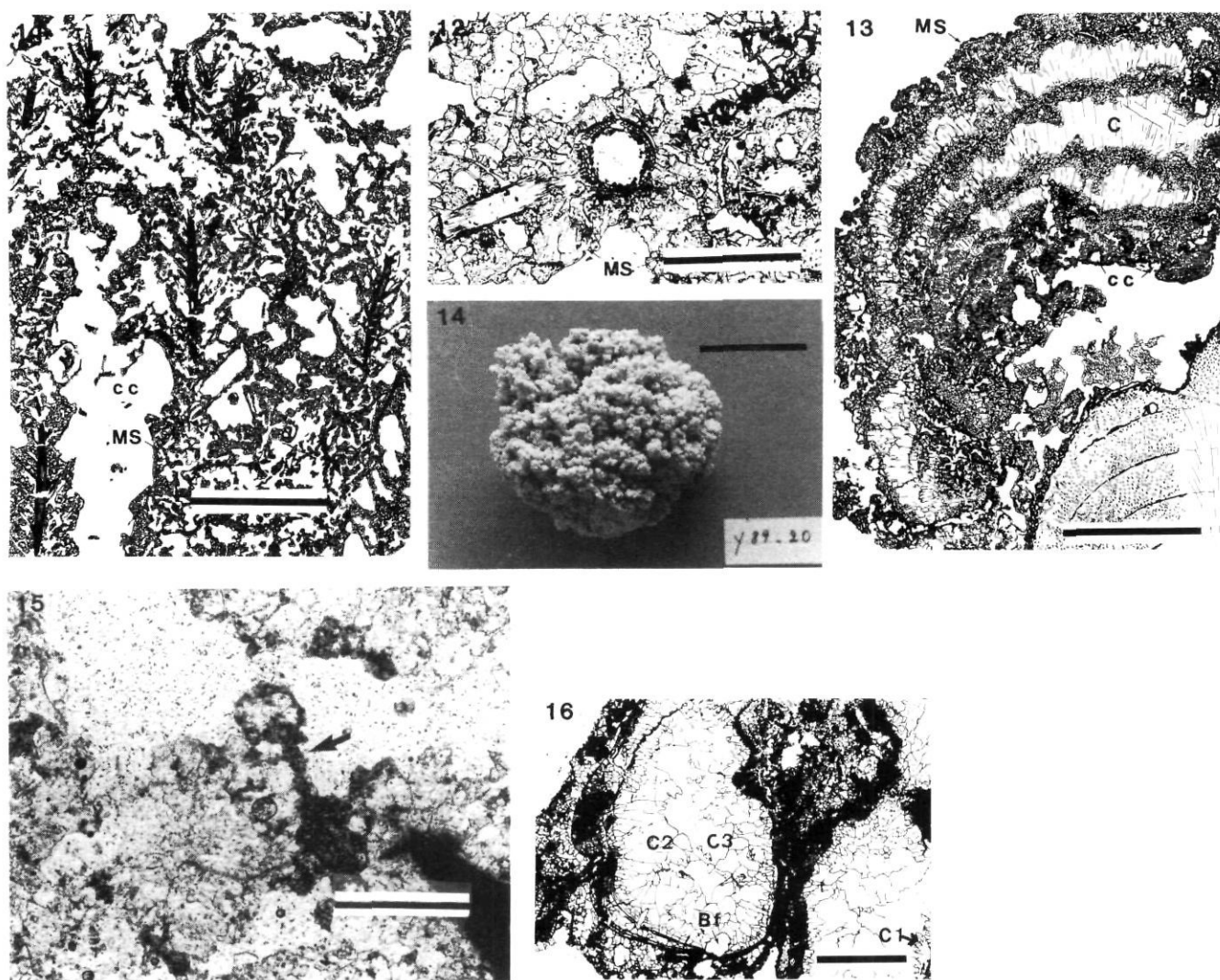


FIGURE 11. Dessin de l'échantillon Y.89-27 d'un sommet de barrage montrant des tiges et des feuilles de *Bryum* sp. recouvertes d'une trame microsparitique (MS). Minces ciments isopaches dans les cavités constitutionnelles (cc) indiquant un milieu phréatique (échelle: 4,3 mm).

Graph of the sample Y.89-27 from a top of a dam showing stems and leaves of Bryum sp. covered by microspar screen (MS). Thin isopach cements in constitutional cavities (cc) indicating a phreatic environment (scale: 4,3 mm).

FIGURE 12. Dessin de l'échantillon (Y.88-10A) montrant la trame microsparitique probablement biogénique autour des mousses (échelle: 0,413 mm).

Graph of the sample Y.88-10A showing the microsparitic screen (probably biogenetic) around the mosses (scale: 0,413 mm).

FIGURE 13. Dessin de l'échantillon (Y.89-10) montrant une alternance de microsparites biogénétiques (MS) et d'une croûte sparitique composée de calcite limpide (C) autour d'un morceau de bois de *Picea*. Quelques cavités constitutionnelles (cc) apparaissent à différents endroits (échelle: 4,3 mm).

Graph of the sample (Y.89-10) showing alternate biogenetic microspars and crusts of sparite (limpid calcite C), around a piece of spruce

wood. Some constitutional cavities (cc) appear at different places (scale: 4,3 mm).

FIGURE 14. Échantillon Y.89-20: faciès en glomérule vu de face (échelle: 3 cm).

Sample Y.89-20: glomerul facies front view (scale: 3 cm).

FIGURE 15. Échantillon Y.88-6: coupe dans le faciès en glomérule montrant des filaments entrelacés (flèche) et une sparite radiaire encirclee des mêmes filaments (échelle: 0,395 mm).

Sample Y.88-6, Cross-section in a glomerul facies showing interlaced filaments (arrow) and radial sparite encircled with same filaments (scale: 0,395 mm).

FIGURE 16. Dessin de l'échantillon (Y.88-1) d'un travertine fossile. On y observe des traces de mousses en noir, trois générations de ciment (C1, C2, C3), qui ont rempli les cavités constitutionnelles, et une perforation qui pourrait être un bioforage (BF) (échelle: 0,520 mm).

Graph of the sample Y.88-1 from a fossil travertine, showing traces of mosses in black, three generations of cements (C1, C2, C3) filling in the constitutional cavities, and a perforation, possibly a bioforage (BF) (scale: 0,520 mm).

La figure 17 montre un modèle de croissance des phytohermes de Coal River Springs. Ils s'accroissent par calcification des mousses, tant verticalement que latéralement. Lorsque les bassins sont en eau, *Bryum* pousse activement et verticalement au sommet des barrages, tandis que *Cratoneuron* occupe les zones plus basses de quelques centimètres et inondées. L'étude a montré que le sommet des barrages peut présenter

des encorbellements inverses en eau calme et des circonvolutions en eau turbulente.

Si le débit n'est pas très important, l'eau qui déborde des bassins forme sur la face aval des barrages, des séries de cascates qui sont colonisées par *Cratoneuron* et *Brachytecium* et aussi par *Bryum*. Dans le site de Coal River Springs, la face

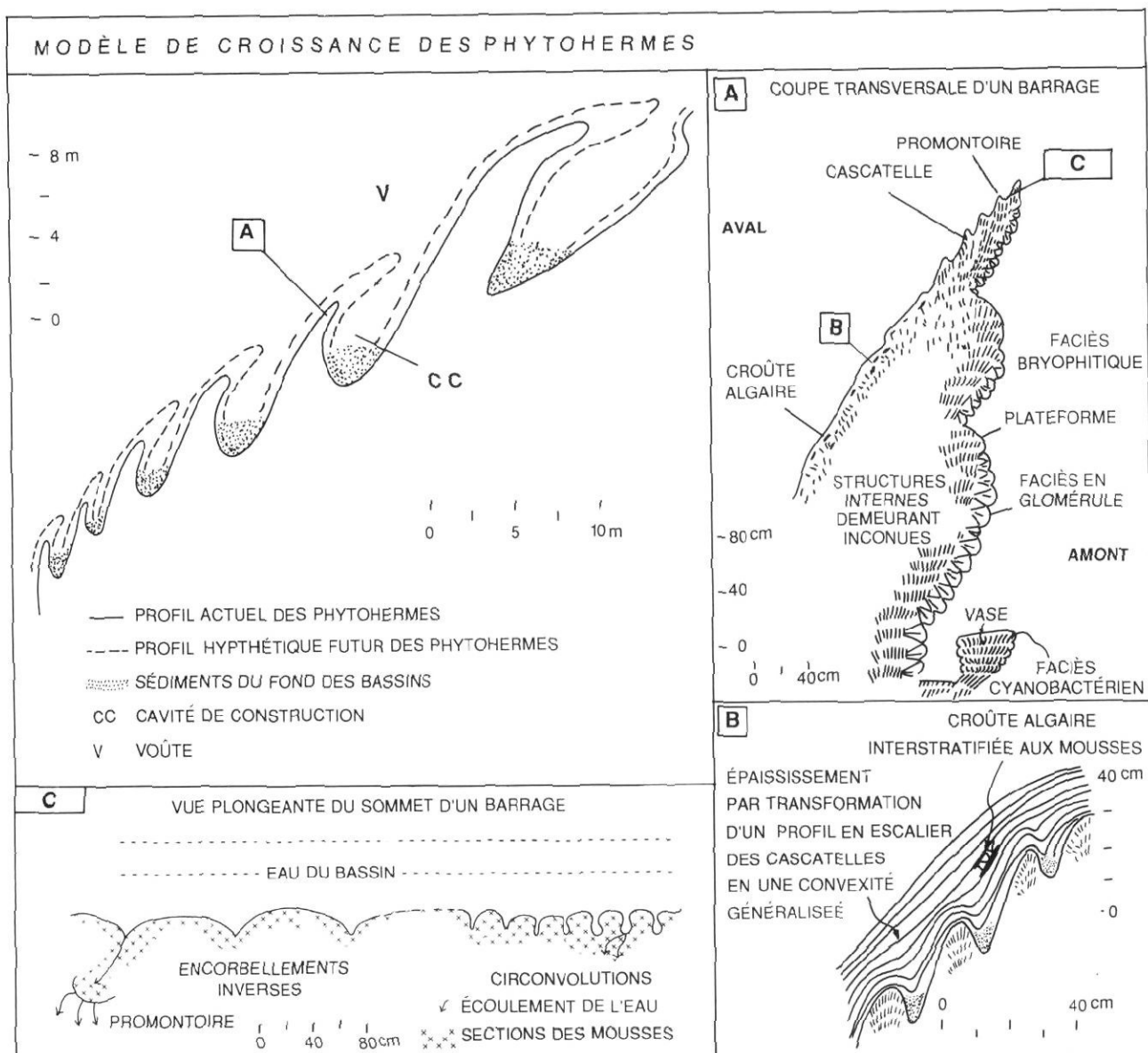


FIGURE 17. Modèle de croissance montrant schématiquement l'évolution des phytohermes depuis leur profil actuel jusqu'au profil hypothétique futur (A). Ce modèle est basé sur le fait que la partie supérieure des grands barrages est penchée vers l'amont. L'élaboration du profil hypothétique s'accompagnerait de la formation de voûtes et de cavités de construction. La coupe transversale d'un barrage (B) montre les principaux faciès intervenant dans la croissance verticale et dans l'épaississement d'un barrage, d'une plateforme et d'un vase. En (C), la vue plongeante d'un sommet de barrage montre le bord supérieur d'un encorbellement inverse avec sa convexité tournée vers le bassin dont il retient l'eau, et latéralement, des circonvolutions. En (D), on voit le détail de l'épaississement de la face aval.

This growth model demonstrates the schematic evolution of phytoherms from their actual profile to an hypothetical profile in the future (A). Observations made on the upstream inclination of the upper part of the biggest dams form the basis of the model. The development of the hypothetical profile is accompanied with vaults formation and the construction of cavities. The transverse section of a dam (B) reveals the principal facies that intervene in the vertical growth and the thickening of the upstream face of the dam, a platform and a vase. In (C), the oblique view of a dam summit shows the top side of an inverse corbel with its convexity facing the pool of water and laterally, the circonvolutions. In (D), we see the thickening of the upstream face of the dam.

aval de chaque petit barrage s'épaissit par encroûtement des mousses et finit par recouvrir le bassin qu'il surplombe, de telle sorte que d'un profil en escalier (comme celui décrit par Symoens *et al.*, 1951 pour les crons de Belgique), on passe progressivement à une convexité généralisée. Si des algues débordent également, elles créeront un lieu propice pour la précipitation de la calcite au moment de l'assèchement. Par ailleurs, si le débit est trop important, une érosion peut se produire au sommet du barrage et sur la face aval.

La face amont des barrages s'épaissit par développement du faciès en glomérule ou du faciès de type *Phormidium/Schizothrix*. Les plateformes visibles sur les faces amont des barrages correspondent aux baisses de niveau des plans d'eau, à des phases d'arrêt de la croissance et à l'érosion des sommets des barrages.

Ce modèle de croissance diffère en trois points de celui que Casanova (1984) a proposé pour établir la relation entre les types de dépôts travertineux, la morphologie du cours d'eau et l'énergie hydrodynamique, à propos du barrage en retenue et du barrage en cascade. Premièrement, les tapis cyanobactériens qui effectuent la croissance verticale du barrage en retenue du milieu méditerranéen sont remplacés ici par une croissance verticale sur les mousses, ce qui a tendance à former des phytohermes souvent plus hauts qu'épais et à sommet étroit et mince, plutôt que plat. Deuxièmement, l'épaississement des barrages ne se fait pas uniquement par progradation horizontale sur la face aval mais aussi par accroissement des glomérules ou du faciès à *Phormidium/Schizothrix* sur la face amont. À l'inverse des barrages dont la croissance se fait essentiellement par progradation horizontale vers l'aval, les barrages de Coal River Springs montrent une croissance surtout verticale ou inclinée vers l'amont. Ceci résulte apparemment de l'association des deux mousses qui occupent les sommets des barrages.

Selon le modèle de Pazdur *et al.* (1988) pour les travertins du sud de la Pologne, c'est dans la zone où la concentration ionique et l'énergie hydrodynamique sont les plus élevées que s'élaborent les faciès bryophytiques. Il apparaît donc que c'est surtout la convexité du talus de terrasse qui provoque l'accroissement d'énergie par augmentation de la vitesse de l'eau. Ceci indique donc que le début de la formation des phytohermes a suivi l'encaissement de la Coal River dans ces alluvions et limite la genèse de ces travertins, leur diagenèse et leur fossilisation, dans une courte période postglaciaire.

Dans les barrages, les formes principales semblent résulter de la réponse des mousses aux variations hydrologiques (eau calme, encoissements inverses; eau turbulente, forme cérébroïde). Ceci, cependant, n'exclut pas le rôle d'algues vertes comme *Spirogyra* ni celui des cyanobactéries et des bactéries. En effet, on a observé entre des tiges de mousses, des diatomées et des balles micritiques à structure radiaire de colonies bactériennes telles que décrites par Folk et Chafetz (1983).

CONCLUSION

Cette étude préliminaire apporte des précisions sur l'origine et le développement des dépôts de travertin de Coal River

Springs. Il s'agit de dépôts holocènes, postérieurs à l'encaissement de la Coal River, édifiés à la faveur de la rupture de pente créée par l'encaissement de la rivière. Celle-ci engendre des barrages (plus spécifiquement des phytohermes) dont la croissance verticale et la forme sont essentiellement liées aux bryophytes. La rupture de pente provoque l'augmentation de la turbulence qui favorise le départ du CO₂ de l'eau. Ces eaux sont hydrothermales, ce qui maintient les écoulements sur les phytohermes en hiver, malgré des températures de l'air très basses. Cependant, la durée d'ensoleillement réduite en hiver devrait atténuer la croissance des mousses et provoquer une réduction de la croissance verticale des barrages. Ceci pourrait expliquer la stratification visible sur les faces amont des barrages.

Bien qu'hydrothermales, les eaux sont mélangées à des apports météoriques et il est apparu que des variations importantes du niveau des eaux peuvent interrompre la croissance verticale des barrages dont le développement se résume dans un modèle en quatre points :

- 1) Une croissance verticale réalisée surtout par la précipitation de la calcite sur les mousses (surtout *Bryum* sp. et *Cratoneuron* sp.) quand les bassins sont en eau.
- 2) Un épaississement de la face aval par l'encroûtement d'algues et de *Gymnostomum recurvirostrum*, et par la transformation de cascades où poussent *Brachytecium* sp. en plus des mousses citées, en une convexité généralisée.
- 3) Un épaississement de la face amont par croissance du faciès en glomérule, probablement bactérien, et par la croissance des faciès cyanobactériens.
- 4) La croissance verticale est limitée par la hauteur du plan d'eau. Ceci peut amener l'apparition d'une croissance penchée vers l'amont, puisque *Cratoneuron* pousse de préférence dans la direction du maximum d'hydratation (c'est-à-dire à l'intérieur des bassins plutôt qu'à l'extérieur) ainsi que du maximum d'oxygénation-luminosité.

Les variations hydrologiques pourraient aussi être un des facteurs qui entraîneraient une augmentation de la concentration ionique, notamment par diminution des apports d'eaux météoriques. Ceci provoquerait une diagenèse précoce par cimentation des cavités constitutionnelles.

Enfin c'est dans la relation morphologie-hydrologie que réside surtout l'originalité de cette étude. Elle a montré en effet que les barrages se caractérisent par des formes en encoissement inverse, c'est à dire à convexité tournée vers l'amont, quand l'eau est calme, et par des formes en circonvolutions quand l'eau est plus turbulente.

Ces formes en encoissement inverse, fréquentes au sommet des grands barrages penchés vers l'amont, pourraient constituer l'assise d'une voûte qui couvrirait un bassin. Ceci pourrait expliquer l'existence de cavités dans de grands dépôts de travertin, cavités dont l'origine ne seraient ainsi pas liée à la dissolution, mais bien à la construction. Il serait utile, par la suite, d'étudier la relation entre l'analyse spatiale écologique des mousses et l'analyse stratigraphique des faciès afin de mieux comprendre les modes de croissance des barrages et leur diagenèse.

REMERCIEMENTS

Cette recherche a été financée par le Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada (subvention A6888) et par la Royal Geographic Society. Les auteurs remercient très sincèrement toutes les personnes qui ont contribué à la réaliser: monsieur F. A. McRae et mademoiselle F. Guay, au Yukon, monsieur Beauharmont du Département de botanique, et messieurs P. Bertran, G. Herman et G. Seret du Département de géologie et géographie, de l'Université catholique de Louvain, messieurs I. D. Clark, G. St-Jean et J.-F. Tardif du Département de géologie et monsieur D. Desmarais du Département de géographie de l'Université d'Ottawa. Madame L. Oviden de la Commission géologique du Canada et monsieur R. R. Ireland du Musée national des sciences naturelles, botanique, ont aimablement contribué à l'identification des mousses. Enfin les remarques constructives de messieurs F. Gullentops et A. Desrochers ont été très appréciées, ainsi que celles des lecteurs critiques, messieurs C. Ek et J. Casanova.

RÉFÉRENCES

- Adolphe, J. P., et Billy, C., 1974. Biosynthèse de la calcite par une association bactérienne aérobie. *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, 278: 2873-2875.
- Barger, K. E., 1978. Geology and thermal history of Mammoth Hot Springs, Yellowstone National Park, Wyo. *Geological Survey Bulletin* 1440, 55 p.
- Braithwaite, C. J. R., Casanova, J., Frevert, T. et Whitton, B. A., 1989. Recent stromatolites in landlocked pools on Aldabra, western Indian Ocean. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 69: 145-165.
- Brandon, L. V., 1965. Groundwater hydrology and water supply in the District of Mackenzie, Yukon Territory, and adjoining parts of British Columbia. *Geological Survey of Canada, Paper* 64-39, 102 p.
- Buccino, G., d'Argenio, B., Ferreri, V., Brancaccio, I., Ferreri, M., Panici, C. et Stanzioni, D., 1978. I travertini della bassa valle dell Tanagro (Campania) studio geomorfologico, sedimentologico e geochemico. *Bollettino della Società Geologica Italiana*, 97: 617-646.
- Casanova, J., 1981. Morphologie et biolithogénèse des barrages de travertins. Actes du colloque de l'Association des géographes français. Formations carbonatées externes, tufs et travertins, p. 45-54.
- 1984. Genèse des carbonates d'un travertin pléistocène: interprétation paléocécologique du sondage Peyres (Comprenac, Aveyron). *Geobios, Mem. spécial n° 8*: 219-225.
- Casanova, J. et Nury, D., 1989. Biosédimentologie des stromatolites fluviolacustres du fossé oligocène de Marseille. *Bulletin de la Société géologique de France*, 8: 1173-1184.
- Chafetz, H. S. et Folk, R., 1984. Travertines: depositional morphology and the bacterial constructed constituents. *Journal of Sedimentary Petrology*, 54: 289-316.
- Caudwell, C., 1983. Les Rivulariacées actuelles: Interprétation possible de la structure zonée des concrétions stromatolitiques à *Rivularia haematites*. *Geobios*, 16: 169-177.
- Crandall, J. T. et Sadlier-Brown, T. L., 1976. Data on geothermal areas: Yukon, Northwest Territories and Northernmost British Columbia. Department of Supply Services, contract 1505-0136. Nevin Sadlier-Brown Goodbrand Ltd, Vancouver.
- Davies, D., Kennedy, C. E. et McKenna, K., 1983. Coal River Springs preliminary biophysical inventory. Land Planning Branch, Department of Renewable Resources, Government of Yukon, 78 p.
- Dennington, M. C., 1975. A reconnaissance of Coal River Springs, Yukon Territory. July 27/75 for IBP-CT panel 10, mimeo, International Biological Programme Report, 11 p.
- Emeis, K.-C., Richnow, H.-H. et Kempe, S., 1987. Travertine formation in Plitvice National Park, Yugoslavia: chemical versus biological control. *Sedimentology*, 34: 595-609.
- Folk, R. L. et Chafetz, H. S., 1983. Pisoliths (Pisoids) in Quaternary travertines of Tivoli, Italy, p. 474-487. In T. M. Peryt, éd., *Coated grains*. Springer Verlag, Berlin.
- Ford, T. D., 1989. Tufa — the whole dam story. *Cave Science*, 16: 39-49.
- Fritz, P., Drimmie R. J., Frape, S. K et O'Shea, K., 1987. The isotopic composition of precipitation and groundwater in Canada. In *Isotopic techniques in water resource development*. I.A.E.A.-S.M. — 299/17: 539-550.
- Gabrielse, H. et Blusson, S. L., 1969. Geology of Coal River Map area (95D) Yukon Territory. *Geological Survey of Canada, paper* 68-38, 21 p.
- Geurts, M.-A., 1976. Genèse et stratigraphie des travertins de fond de vallée en Belgique. *Acta geographica Lovaniensia* 16, 66 p.
- 1988. De l'aéropalynologie aux paléocirculations atmosphériques: cas des travertins holocènes. *Géographie physique et Quaternaire*, 42: 97-99.
- Gimingham, C. H. et Birse, E., 1957. Ecological studies of growth-form in bryophytes. 1. Correlations between growth form and habitat. *Journal of Ecology*, 45: 433-445.
- Golubic, S., 1973. The relationship between blue-green algae and carbonate deposits, p. 434-472. In N. E. Carr et B. Whitton, éd., *The biology of blue-green algae*. Basil Blackwell, Oxford.
- Guendon, J. L. et Vaudour, J., 1981. Les tufs holocènes de Saint Antonin-sur-Bayon (B. du R.), aspects pétrographiques, signification paléogéographique. Actes du colloque de l'Association des géographes français, Formations carbonatées externes, p. 89-100.
- Hill, D., 1956. Rugosa, p. 234-327. In R. C. Moore, *Treatise on invertebrate paleontology*. Geological Society of America and University of Kansas Press.
- Irion, G. et Muller, G., 1968. Mineralogy, petrology and chemical composition of some calcareous tufa from the Schwabische Alb, Germany, p. 157-171. In G. Muller et G. M. Friedmann, éd., *Recent Developments in Carbonate Sedimentology in Central Europe*. Springer-Verlag, New York.
- Julia, R., 1983. Travertines, p. 64-72. In P. A. Scholle, D. G. Bebout et C. H. Moore, éd., *Carbonate depositional environments*. American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, Memoir 33.
- Lang, J. et Lucas, G., 1970. Contribution à l'étude des biohermes continentaux, barrages des lacs de Band-e-Amir (Afghanistan central). *Bulletin de la Société géologique de France* 7 (5): 834-842.
- Lorah, M. M. et Herman, J. S., 1988. The chemical evolution of travertine-depositing stream: geochemical processes and transfer reactions. *Water Resources Research*, 24 (9): 1541-1552.
- Moise, B., 1983. Coal River Springs, Yukon's hidden paradise. *Canadian Geographic*, oct.-nov., p. 18-24.
- Monty, C. L. V., 1976. The origin and development of cryptalgal fabrics, p. 194-249. In M. R. Walter, éd., *Developments in sedimentology*, vol. 20. Stromatolites. Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York.
- Monty, C. L. et Mas, J. R., 1981. Lower Cretaceous (Wealdian) blue-green algal deposits of the Province of Valencia, Eastern Spain, p. 85-120. In Monty, C. L., éd., *Phanerozoic Stromatolites*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York.
- Newton, M. S. et Grosman, E. L., 1988. Late Quaternary chronology of tufa deposits, Walker Lake, Nevada. *Journal of Geology*, 417-433.
- Pazdur, A., Pazdur, M. F., Starkel, L. et Sculz, J., 1988. Stable isotopes of Holocene calcareous tufa in Southern Poland as paleoclimatic indicators. *Quaternary Research*, 30: 177-189.
- Pedley, H. M., 1987. The Flandrian (Quaternary) Caerwys tufa, North Wales: an ancient barrage tufa deposit. *Proceedings of the Yorkshire Geological Society*, 46 (2): 177-189.
- Pentecost, A., 1987. Some observations on the growth rates of mosses associated with tufa and the interpretation of some postglacial bryoliths. *Cave Science*, 14: 543-550.

- Pentecost, A. et Lord, T., 1988. Postglacial tufas and travertines from Craven District of Yorkshire. *Cave Science*, 15: 15-19.
- Poty, E., 1981. Recherches sur les tétracoralliaires et les hétérocoralliaires du viséen de Belgique. *Mededelingen rijks geologische dienst, Heerlem*, 35-1, 161 p.
- Richardson, D. H. S., 1981. *The biology of mosses*. Wiley and Sons, Toronto, 220 p.
- Rolic, J., 1981. Les barrages de tufs calcaires aux lacs de Plivice. Actes du colloque de l'Association des géographes français. Formations carbonatées externes, tufs et travertins, p. 137-144.
- Souther, J. G. et Halstead, E. C., 1973. Mineral and thermal waters of Canada. Energy, Mines and Resources, Paper 73-18: 225-256.
- Steere, W. C. et Scotter, G. W., 1978. Bryophytes from the Southern Eastern Yukon Territory, Canada. *Brittonia*, 30: 395-403.
- Symoens, J.-J., Duvigneaud, P. et Vanden Berghen, C., 1951. Aperçu sur la végétation des tufs calcaires de la Belgique. *Bulletin de la Société royale de botanique de Belgique*, 83: 329-352.
- Tera Environment Consultants Ltd., 1983. Preliminary Inventory and Assessment of the Coal River Springs. 11 p. (non publié).
- Utech, N. M. et Chafetz, H. S., 1989. Geochemical and Petrographic Analyses of travertine — precipitating waters and travertine deposits, Arbuckle Mountains, Oklahoma. *American Association of Petroleum Geologist*, 73 (3): 421.
- Viles, H. A. et Goudie, A. S., 1990. Tufas, travertines and allied carbonate deposits. *Progress in Physical Geography*, 14: 19-41.
- Wahl, H. E., Frazer, D. B., Harvey, R. C. et Maxwell, J. B., 1987. Climate of Yukon. *Climatological Studies Number 40*, Environment Canada, Atmospheric Environment Service, 323 p.